# تعیین مقاومت چسبندگی صفحات CFRP در برابر تغییر دما،تر و خشک شدن و یخ زدن و آب شدن، به روش «پیچش»★

محمود نادری[۱]　　سید آرش حاجی نصری[۲]

**چکیده** *امروزه استفاده از ورق‌های کامپوزیتی FRP برای تعمیر، تقویت و افزایش ظرفیت باربری سازه‌های بتنی به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر و با صرفه شناخته شده است. این ورق‌ها علاوه بر نسبت مقاومت به وزن بالا و امکان نصب به هنگام بهره‌برداری از سازه، در مقابل خستگی ناشی از بارگذاری بسیار مقاومند. به‌علاوه نصب آسان این ورق‌ها امتیاز غیرقابل‌انکاری می‌باشد. دوام کلی سازه‌هایی که به‌کمک این لایه‌ها تقویت می‌یابند، غالباً در مواجه با رطوبت و سیکل‌های دمای پایین و بالا، کاسته می‌شود. با این‌که مطالعات قابل‌توجهی در خصوص مکانیزم شکست، میزان افزایش مقاومت و تغییرات در شکل‌پذیری سازه‌های تقویت‌شده با FRP در دهه‌های گذشته صورت پذیرفته است، لیکن نتایج تحقیقات بر روی دوام این لایه‌ها اندک می‌باشد. از این‌رو این تحقیق به بررسی دوام این صفحات تحت عوامل تغییر دما، تر و خشک شدن، و یخ زدن و آب شدن می‌پردازد. طی این تحقیقات، برای هر شرایط محیطی، صفحات CFRP به هشت وجه بتن مکعبی با ابعاد ۱۵×۱۵ سانتی‌متر چسبانده شده و در پایان هر ۳۰ سیکل مقاومت چسبندگی این صفحات با به کارگیری روش «پیچش» اندازه‌گیری گردیده است. نتایج به‌دست آمده از این بررسی‌ها نشان می‌دهد که سیکل‌های تر و خشک شدن و تغییرات دما، تأثیری اندک و سیکل‌های یخ زدن و آب شدن تأثیر چشم‌گیری در کاهش چسبندگی CFRP به بتن داشته‌اند.*

**واژه‌های کلیدی** CFRP ،تغییرات دما، تر و خشک شدن، یخ و ذوب یخ، روش پیچش.

# Determination of Bond Strength of CFRP Sheets, Exposed to Temperature Changes, Wetting and Drying, and Freeze-Thaw Cycles, Using Twist-off Method

M. Naderi　　S.A. Hajinasri

**Abstract** *Nowadays FRP composite sheets for structural repair, as an efficient and cost-effective technique for restoring and upgrading the load bearing of concrete structures are have become very common. In addition to high strength to weight ratio and the use of FRP sheets while structure is in use, these sheets have good fatigue resistance. Furthermore, their easy application is also an undeniable advantage. When exposed to cyclic temperature changes, wetting and drying and freezing and thawing, the FRP retrofitted structures do not show acceptable durability. Although, considerable researches have been reported on failure modes and increment of strength and changes in ductility of the FRP strengthened elements, but experimental data on their durability are scarce. Hence, this investigation focuses on the durability of these sheets under temperature changes, wetting and drying and freeze - thaw cycles. During this investigation, CRFP sheets were glued to all 8 surfaces of 15×15cmconcrete cubes for every environmental condition. At the end of every thirty cycles, adhesional strength of CFRP sheets were determined using the Twist-off method. The results show that, while the effects of wetting and drying and temperature changes on the CFRP/concrete interfacial adhesion are not considerable, the decreasing effect of freezing and thawing is enormous.*

**Keywords** CFRP, Temperature Changes, Wetting and Drying, Freeze and Thaw, Twist-off Method.

---

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۱/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۲/۱۲ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره).

(۲) کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره).

**مقدمه**

به‌دلیل مشکلات مربوط به دوام و بهره برداری، بسیاری از سازه‌های بتن آرمه‌ی موجود، دچارآسیب‌های جدی شده‌اند. تعمیر، تقویت و جایگزینی این سازه‌ها میلیون‌ها دلار خسارت به بار آورده و فقط در آمریکا، بیش از ٤٠ درصد پل‌های شاهراهی نیاز به تعویض و یا بازسازی پیدا کرده‌اند [3]. هم‌چنین هزینه‌ی بازسازی و تعمیر پارکینگ‌ها درکانادا، تا ٦ میلیارد دلار کانادا و هزینه‌ی تعمیر پل‌های شاه‌راه‌ها در آمریکا حدود ٥٠ میلیارد دلار برآورد شده و این در حالی است که پیش‌بینی شده است برای بازسازی کلیه‌ی سازه‌های بتن آرمه در آمریکا که به‌دلیل خوردگی میلگردها آسیب دیده‌اند به بودجه‌ای بین ۱ تا ۳ تریلیون دلار نیاز است [1-4].

استفاده از مواد مرکب تشکیل شده از الیاف آغشته به رزین به‌عنوان پلیمرهای مسلح شده با الیاف یعنی Fiber Reinforced Polymers (FRP)، برای مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی موجود به‌منظور تحمل بارهای بیشتر، بهبود دوام، افزایش شکل‌پذیری و روز به‌روز توجه بیشتری را به خود جلب می‌نماید. سیستم های FRP سبک، مقاوم در برابر خوردگی و دارای مقاومت کششی بالا می‌باشندکه به شکل‌های مختلف و در گستره‌ای از انواع ورقه‌های چندلایه قابل دسترسی می‌باشند. با این‌که سیستم‌های FRP نسبت به دیگر مصالح متعارف مانند بتن و فولاد گران‌تر هستند، ولی ممکن است به‌دلیل سرعت اعمال این سیستم‌ها و آماده‌ی بهره‌برداری شدن سازه‌ی تقویت‌شده درمدت زمان کمتر و مناسب بودن آنها برای سطوح با دسترسی‌های محدود یا جاهایی که اجرای سیستم‌های متعارف با مشکلاتی مواجه هستند، اقتصادی باشند [1]. سیستم‌های FRP از الیاف و رزین تشکیل شده‌اند که الیاف با خاصیتالاستیکی،تردوبسیارمقاومبوده و قسمت اصلی باربر در سیستم های FRP محسوب می‌شوند. بسته به نوع الیاف، قطر آنها بین ٥ تا ٢٥میکرون می‌باشد. الیاف ممکن است از شیشه، کربن، آرامید و یا وینیلون باشند که محصولات کامپوزیت مربوطه به‌ترتیب به نام‌های GFRP، CFRP، AFRP و VFRP شناخته می‌شوند [5,6]. رزین اصولاً به‌عنوان یک محیط محافظ و چسباننده عمل می‌کند، و الیاف را در کنار یکدیگر نگاه می‌دارد. با این وجود، به نظر می‌رسد که رزین‌های کم‌مقاومت تأثیر چشم‌گیری بر خواص مکانیکی کامپوزیت نظیر مدول الاستیسیته و مقاومت نهایی آنها نداشته باشند. رزین‌ها می‌توانند از نوع ترموست و یا ترموپلاستیک انتخاب شوند. درحالی که رزین‌های ترموپلاستیک را می‌توان با اعمال حرارت، به حالت مایع و با اعمال برودت به حالت جامد درآورد، رزین‌های ترموست با اعمال حرارت سخت می‌شوند و دیگر به حالت مایع یا روان درنمی‌آیند. به‌عنوان رزین‌های ترموست می‌توان پلی‌استر، وینیل‌استر و اپوکسی، و به عنوان رزین‌های ترموپلاستیک از پلی وینیل کلرید، پلی‌اتیلن و پلی پروپیلن نامبرد [1,4].

از جمله مکانیزیم‌هایی که دوام کامپوزیت‌های یاد شده را تحت تأثیر قرار می‌دهند، عبارتند از:

۱- تغییرات شیمیایی یا فیزیکی ماتریس پلیمر.

۲- از دست رفتن چسبندگی بین الیاف و ماتریس.

۳- کاهش در مقاومت و سختی الیاف[7].

محیط و شرایط بهره‌برداری می‌توانند نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییر خواص پلیمرهای کامپوزیت‌ها ایفا نمایند.این کامپوزیت‌ها ممکن است با رطوبت، دما، نور خورشید و مشخصاً تشعشعات ماورای بنفش (UV)، ازن و نیز حضور بعضی از مواد شیمیایی تجزیه‌کننده نظیر نمک‌ها و قلیایی‌ها تحت تأثیر قرار گیرند. هم‌چنین تغییرات تکراری دما ممکن است به‌صورت سیکل‌های یخ زدن و ذوب شدن، تغییراتی را در ویژگی‌های کامپوزیت باعث گردد. به همین دلیل تحقیقات متعددی درباره‌ی دوام FRP انجام شده است که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره شده است.

در مورد بارگذاری FRP در دماهای بالا (حدود

۲۰۰+ درجه‌ی سانتی‌گراد)، مطالبی ارائه گردیده است که چسبندگی در این محدوده‌ی دمایی مورد مطالعه قرار گرفته است [8]. نتایج آزمایشگاهی این مطالعات، کاهشی بین ۸۰ تا ۹۰ درصد در مقاومت چسبندگی را نشان می‌دهد که متناسب با افزایش دما از ۲۰+ درجه‌ی سانتی‌گراد تا ۲۵۰+ درجه‌ی سانتی‌گراد رخ می‌دهد. بررسی دوام لایه‌های CFRP به کار گرفته شده جهت تقویت سازه‌های بنایی نیز مورد بررسی قرار گرفته است [9]. هدف اصلی این بررسی‌ها تغییرات در مقاومت در اثر سیکل‌های تر و خشک بوده است. دراین تحقیقات در حالی که یک سری از نمونه‌ها به‌مدت ۱۰ دقیقه در آب خیسانده شده و سپس به‌مدت ٤٨ ساعت در دمای آزمایشگاه خشک گردیدند، در سری دوم، زمان خیس خوردن نمونه‌ها به ۲۰ دقیقه افزایش یافته است. به‌منظور بررسی عملکرد تر و خشک شدن سعی گردیده است تا سیکل‌های مختلف تر و خشک به نمونه‌ها اعمال شوند و پس از آن نمونه‌ها با کمک روش کنترل تغییر-مکان بارگذاری گردند. نتایج به دست آمده از کاهش مقاومت نمونه‌های تحت آزمایش نسبت به نمونه‌های کنترل خبر می‌دهند. به‌نحوی که در سری اول با اعمال ٦، ۱۲، ٢٤ و ٤٨ سیکل تر و خشک شدن به‌ترتیب ۱، ۱۷، ۱۷ و ۱۷ درصد از مقاومت نمونه‌ها کاسته شده است. هم‌چنین برای سری دوم این آزمایش‌ها، کاهش مقاومت به‌ترتیب ۹، ۱۷، ۱۷ و ۱۸ گزارش گردیده است. به‌طور کلی می‌توان عنوان نمود که سیکل‌های تر و خشک شدن باعث کاهش مقاومت نمونه‌ها گردیده و غالب این کاهش مقاومت‌ها در سیکل‌های اولیه صورت گرفته است.

هم‌چنین طی تحقیقاتی، تیرهای غیرمسلح بتنی ۹×۱۰×۹۰ سانتی‌متری که با استفاده از GFRP تقویت شده بودند، تحت شرایط مختلف محیطی شامل شرایط عادی و شرایط تسریع‌شده‌ی یخ زدن و آب شدن در دماهای ۱۸- تا ۲۳ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار داده شدند. جدایش (Debonding) لایه‌های این نمونه‌ها به‌کمک روش فوتوالاستیک بررسی گردیده‌اند. در این آزمایش‌ها که از الیاف با مدول ۷۲/٤GPa و مقاومت نهایی ۱۵۰MPa، باعرض ۱۸ میلی‌متر استفاده شده است، با اعمال ۲۰ درصد بار نهایی، ترک‌هایی پدید آمده است و تمامی شکست‌ها از نوع جدایش FRP بوده‌اند [10].

با توجه به‌این‌که استفاده از FRP برای تعمیر و به‌سازی سازه‌های بتنی در ایران نیز در حال افزایش است وهم‌چنین ایران از نظر جغرافیایی در موقعیتی قرار دارد که دارای شرایط مختلف آب و هوایی سرد، گرم و مرطوب می‌باشد که هر یک از این عوامل می‌تواند اثر مخربی روی چسبندگی FRP به بتن که نقش بسیار مهمی در رفتار سازه دارد، داشته باشد. از این‌رو این پژوهش به بررسی دوام این صفحات تحت عوامل تغییر دما، تر و خشک شدن و یخ زدن و آب شدن می‌پردازد.

## مصالح به کارگرفته شده بتن بستر

شنی که در این تحقیقات استفاده شده است، شن رودخانه‌ای با اندازه‌ی بزرگ‌ترین شن ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. ماسه‌ی مصرفی از نوع رودخانه‌ای می‌باشد.

سیمان مصرفی از نوع سیمان تیپ ۲ آبیک می‌باشد. در این سیمان اصلاح شده روند توسعه‌ی گرما قدری بیشتر از سیمان با گرمای کم، و روند کسب مقاومت مشابه با سیمان پرتلند معمولی می‌باشد، سیمان اصلاح شده برای مصرف در سازه‌هایی که ایجاد گرمای تعدیل‌شده‌ای در آنها مطلوب باشد یا در مواقعی که ممکن است حمله‌ی ملایم سولفات‌ها رخ دهد، توصیه شده است [۱۱]. مشخصات سیمان اصلاح‌شده، به نام سیمان نوع II در آیین‌نامه‌ی ASTM C 150-04 آمده است [12].

میکروسیلیس محصولی فرعی است که به‌عنوان پوزولان مورد استفاده قرار می‌گیرد.این محصول فرعی نتیجه‌ی احیای کوارتز بسیار خالص با زغال سنگ در کوره‌ی قوس الکتریکی در ساخت آلیاژ فرو سیلیسیم یا سیلیسیم است. میکروسیلیس ماده‌ای بسیار نرم با قطر ذرات کمتر از ۱μm و قطر متوسط تقریباً ۰/۱μm ، یعنی چیزی در حدود یک‌صدم ذرات متوسط سیمان می‌باشد [۱۱].

به‌طور کلی فوق‌روان‌کننده یک کاهنده‌ی آب قوی مطابق با الزامات مندرج در آئین نامه‌ی ASTM C1017

می‌باشد [13]. این افزودنی‌ها به‌منظور کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش کارایی بتن به‌کار می‌روند. فوق‌روان‌کننده‌ی استفاده شده در این تحقیقات از نوع نوترال 102N محصول شرکت بتن شیمی می‌باشد که مشخصات آن در جدول (۱) آمده است.

## الیاف کربن

معمولاًالیاف کربن در دو گروه طبقه‌بندی می‌شوند [14]:

۱- الیاف کربنی از نوع PAN که دارای سه نوع مختلف می‌باشد. نوع یک که تردترین آنها با بالاترین مدول الاستیسیته محسوب می‌شود، نوع دو که مقاوم‌ترین الیاف کربن است و نوع سه که نرمترین نوع الیاف کربنی با مقاومتی بین نوع یک و دو می‌باشد.

۲- الیاف با اساس قیری (Pitch-based) که اساساً از تقطیر زغال‌سنگ به‌دست می‌آیند. این الیاف از الیاف PAN ارزان‌تر است و مقاومت و مدول الاستیسیته‌ی کمتری نسبت به آنها دارند. لازم به ذکر است که الیاف کربن مقاومت بسیار خوبی در محیط‌های قلیایی و اسیدی دارند و در شرایط سخت محیطی از نظر شیمیایی کاملاً پایدار می‌باشند. صفحات الیافی استفاده شده در این تحقیقات از نوع کربن با مقاومت بالا(CFRP) بوده است که دارای الیاف یک‌جهته می‌باشد که مشخصات آن‌ها در جدول (۲)نشان داده شده است.

## چسب مصرفی

چسب مورد استفاده در این تحقیقات از دو جزء تشکیل شده بود؛ یکی رزین که رنگ آن سفید و دیگری سخت‌کننده که رنگ آن سیاه می‌باشد. ترکیب این دو با نسبت وزنی ۳ به ۱، چسبی به رنگ خاکستری تیره می‌دهد. مشخصات این چسب در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۱ مشخصات فوق‌روان‌کننده‌ی نوترال N102

| رنگ | حالت | PH | وزن مخصوص $kg/m^3$ | قابلیت انحلال در آب | مقدار مجاز مصرف (درصد کل مصالح سیمانی) |
|---|---|---|---|---|---|
| صورتی | مایع | ۷ | ۱۰۷۰ | دارد | ۱ تا ۲ |

جدول ۲ مشخصات صفحات با الیاف کربنی

| | |
|---|---|
| ۵۰ | عرض صفحه (mm) |
| ۰/۱۲ | ضخامت صفحه (mm) |
| ۲٤۰۰۰۰ | مدول الاستیسیته‌ی کششی الیاف (MPa) |
| ۳۸۰۰ | مقاومت کششی الیاف (MPa) |
| ۰/۳۵ | ضریب پواسون |
| ۲۰۰ | وزن مترمربع صفحه ($gr/m^2$) |
| ۱/۵۸ | افزایش طول نهایی الیاف(٪) |

جدول ۳ مشخصات چسب مورد استفاده

| | |
|---|---|
| ۱٤ | زمان گیرش در دمای $^\circ$C ۲۱ (ساعت) |
| ۷۹ | Tg($^\circ$C) |
| ۵۵ | مقاومت کششی(MPa) |
| ۲۱۰۰ | مدول الاستیسیته‌ی کششی(MPa) |
| ۰/۳۵ | ضریب پواسون |

## مراحل انجام آزمایش

### طرح اختلاط بتن بستر

با این‌که به عقیده‌ی بعضی‌ها، مقاومت فشاری بتن بستر تأثیر بسیار کمی در مقدار باری که باعث جداشدگی FRP از سطح بتن دارد و افزایش مقاومت فشاری بتن بستر، تأثیری در مقاومت چسبندگی ندارد [15]. برای رسیدن به یک بتن با مقاومت بالا طرح اختلاط جدول(٤) مورد استفاده قرار گرفت که بعد از ۷۰ روز غرقاب بودن، دارای مقاومت فشاری ۷۵ مگاپاسکال گردید. انتخاب این مقاومت بالابه‌این دلیل بود تا در هنگام انجام آزمون‌ها، اطمینان حاصل شود که شکست در بستر بتنی به حداقل رسیده است و بتوان مقاومت چسبندگی بین لایه‌ی FRP و بستر بتنی را اندازه‌گیری نمود.

جدول ٤ طرح اختلاط بتن بستر

| | |
|---|---|
| سیمان $kg/m^3$ | ٤۰۵ |
| میکروسیلیس $kg/m^3$ | ٤۵ |
| شن $kg/m^3$ | ۱۰۸۰ |
| ماسه $kg/m^3$ | ۷۲۰ |
| آب $kg/m^3$ | ۱۳۵ |
| نسبت آب به مصالح سیمانی | ۰/۳ |
| فوق روان کننده $kg/m^3$ | ۹ |

### مراحل ساخت بتن بستر

پس از اضافه کردن ماسه به داخل مخلوط‌کن، سیمان به مخلوط اضافه شد و به‌مدت ۳۰ ثانیه مصالح ریخته‌شده با هم مخلوط شدند. به‌منظور پخش بهتر میکروسیلیس در داخل بتن و عملکرد مناسب آن، میکروسیلیس به آب طرح اختلاط اضافه گردید و به‌صورت ژل میکروسیلیس به داخل مخلوط‌کن ریخته شد. مواد فوق‌روان‌کننده نیز در پایان اضافه شدو سه دقیقه عمل اختلاط ادامه پیدا کرد. سپس نمونه‌های بتنیدر ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر ساخته شد و بعد از گذشت ٢٤ ساعت نمونه‌ها درداخل مخزن آب قرار داده شدند.

### چسباندن صفحات CFRP به نمونه‌های مکعبی

از صفحات الیاف کربنی که دارای عرض ۵۰ سانتی‌متر و طول ٦ متر بود، ٢٤ صفحه‌ی مربعی به طول ۱۵ سانتی‌متر (به اندازه‌ی ابعاد نمونه‌ی بتن مکعبی) به‌وسیله‌ی قیچی معمولی بریده شد.

مواد متشکله‌ی رزین‌ها غالباً دارای رنگ‌های متفاوت می‌باشند و باید آن‌قدر مخلوط شوند تا این‌که مخلوط به رنگ یکنواخت برسد. لوازم هم‌زدن مواد عبارت بودند از پاروک‌های مخلوط‌کن برقی یا دستگاه‌های خاص، و هم‌چنین در بعضی شرایط هم‌زنی که می‌تواند با دست انجام شود. در هر مرحله از اختلاط مواد، باید حجم کم و مناسبی تهیه شود تا بتوان در مدت زمان اجرا از سفت و سخت شدن مواد، از مخلوط به‌طور کامل استفاده نمود [1]. عواملی مانند کیفیت مصالح، مهارت نیروی کاری،کیفیت سطح بتن بستر و نوع FRP در ایجاد یک چسبندگی خوب مؤثر می‌باشند.هم‌چنین باید در لبه‌ها چسبندگی کافی ایجاد شود تا از نفوذ آب جلوگیری گردد[16]. افزایش طول و پهنای نوارهای FRP باعث می‌شود که مقدار باری که باعث گسیختگی بین بتن بستر و FRPمی‌شود، افزایش یابد[15]. برای نصب سیستم FRP، ورقه‌های الیاف بدون هر نوع آلودگی، با دست نصب می‌شوند و از رزین آغشته‌سازی مطابق با توصیه‌های سازنده‌ی سیستم استفاده می‌شود. رزین آغشته‌سازی باید به‌صورت یکنواخت به تمام سطوح آماده‌سازی شده جهت سیستم FRP مالیده شود. الیاف می‌تواند در یک فرآیند جداگانه به‌کمک دستگاه آغشته‌ساز با مواد رزین بارور و اشباع شده و بعد از آن روی سطح بتن نصب شوند. الیاف مقاوم‌سازی باید مطابق با سازنده بعد از آغشته نمودن به رزین به آرامی فشرده شود تا رزین اضافه خارج شود. قبل از گیرش رزین، حباب‌های هوا و طبله‌های موجود بین لایه‌ها باید خارج شوند. در آغشته نمودن الیاف به رزین باید دقت شود که تمامی

الیاف کاملاً اشباع شوند [1].

سطح بتن بستر با یک سمبادهی نرم ساییده شد تا مواد زائد روی آن از بین برود و سپس با یک دستمال خیس گرد و غبار روی سطح بتن پاک گردید. پس از آنکه سطح بتن خشک شد با کاردک مقداری از مخلوط چسب به روی سطح بتن بهطور یکنواخت پخش گردید. ضخامت چسب روی سطح بتن باید در حدود ۱ میلیمتر باشد. بعد الیاف روی سطح بتن قرار داده شوند وبا کمی فشار دوباره با کاردک مقداری چسب روی الیاف مالیده شد و بهطور یکنواخت پخش گردید (شکل ۱ و ۲).



شکل۱ قرار دادن صفحهی الیاف کربنی روی چسبهای اعمال شده



شکل ۲ اعمال چسب روی صفحهی الیاف کربنی

## تعبیهی مغزههای جزئی برای انجام آزمون «پیچش»

همانگونه که در شکل (۳) نشان داده شده است، ایجاد مغزههای جزئی با بهکار گیری متههای الماسهیبتنبر صورت گرفت. در هر وجه نمونههای بتنی، چهار مغزهی جزئی با قطر ۵۰ میلیمتر و ارتفاع حدود ۷ میلیمتر تعبیه گردید. در واقع عمق مغزههای جزئی، شامل ۲ میلیمتر ضخامت کامپوزیت و ۵ میلیمتر نفوذ در بتن بستر میباشد که درشکل (٤) نشان داده شده است.



شکل ۳ دستگاه مغزهگیر



شکل ٤ تعبیهی مغزههای جزئی

## سیکلهای تغییر دما

در این سری از آزمایشها، دو نمونهی بتنی بهمدت ۲ ساعت در دمای ٦۰+ درجهی سانتیگراد در داخل آون و بهمدت دو ساعت در دمای محیط آزمایشگاه (۲۳+ درجهی سانتیگراد) قرار داده شدند تا خنک شوند.

تعداد سیکل‌های انجام شـده ۳۰، ٦۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ مرتبه می‌باشد.

## سیکل‌های تروخشک شدن

در این سری از آزمایش‌ها، دو نمونه‌ی بتنـی در آب بـا دمای محیط آزمایشـگاه (۲۳+ درجـه‌ی سـانتی‌گـراد) به‌مدت ٤ ساعت قرار داده شدند. بعـد آن دو نمونـه را از داخل آب خارج کردند و در محیط آزمایشگاه (۲۳+ درجه‌ی سانتی‌گراد) به‌مدت ٤ سـاعت قـرار دادنـد تـا خشک شود. تعداد سیکل‌های انجام‌شده به‌ترتیـب ۳۰، ٦۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ مرتبه می‌باشد.

## سیکل‌های یخ زدن و آب شدن

اسـتاندارد ASTM-C666 دو روش بـرای سـنجش مقاومت در برابر یخ زدگی ذکر می‌کند. در یـک روش، یخ زدن و ذوب شـدن در آب صـورت مـی‌گیـرد و در روش دیگر یخ زدن در هوا و ذوب شدن در آب انجام می‌شود. آسیب‌دیدگی نمونه‌های یخ‌زده در حالت اشباع بسیار شدیدتر از حالت یخ زدن در هوا می‌باشد. مطابق استاندارد ASTM-C666 یخ زدن و آب شدن را معمولاً تا ۳۰۰ سیکل انجام می‌دهند [17]. در ایـن تحقیقـات، دو نمونه به‌مدت ۲/۵ ساعت در دمـای ۱۷- درجـه‌ی سانتی‌گراد یخ زدند و به مـدت ۲/۵ سـاعت در آب بـا دمـای ٤+ درجـه سـانتی‌گـراد ذوب شـدند. تعـداد سیکل‌های انجام‌شده به‌ترتیـب ۳۰، ٦۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ می‌باشد.

## آزمون «پیچش»

آزمون «پیچش» که اخیراً نـادری [18]، آن را بـه‌عنـوان آخرین و جدیدترین روش از گـروه روش‌هـای دارای خرابی جزئی ابداع کـرده اسـت، یـک روش دقیـق بـا کاربری وسیع در تعیین مقاومت بتن و تعیـین مقاومـت چسبندگی لایه‌های تعمیری هم در آزمایشگاه و هم در محل سازه است و به‌عنوان یک تکنیک سریع، دقیـق و کم‌هزینه با خرابـی بسـیار جزئـی محسـوب مـی‌شـود. جذابیت این روش در دقت، سـرعت انجـام، سـادگی، خرابی جزئی و هزینه‌ی اندک انجام آن است کـه آن را در مقایسه با سایر آزمـایش‌هـای درجـا ممتـاز سـاخته است.این آزمون در حالت‌های افقی، قائم و به‌طور کلی بر روی هر سطح صـافی بـه‌سـادگی و بـدون نیـاز بـه برنامه‌ریزی قبلی قابل انجام است. ابزار مـورد اسـتفاده در این آزمایش بسیار سـاده و قابـل دسـترس اسـت و انجام آزمایش نیز نیاز به مهارت قبلی ندارد.

قبل و بعد از این‌که نمونه‌های آزمایشگاهی تحت شرایط سیکل‌های تغییر دما، تر و خشـک شـدن و یـخ زدن و آب شـدن قـرار داده شـوند، تحـت آزمـایش «پیچش» قرار گرفتند. همان‌گونه که در شکل‌های (۵) و (٦) نشان داده شده است، در روش «پیچش» ابتدا یـک اسـتوانه‌ی فلـزی بـه قطـر ۵۰ و ارتفـاع ۳۰ میلـی‌متـر، به‌کمک چسب که شامل یک سیستم اپوکسی دو قسمته است، بر روی مغزه‌هـای جزئـی تعبیـه‌شـده چسـبانده می‌شود. بعد از ۲٤ سـاعت (از زمـان گیـرش چسـب) به‌وسیله‌ی یک پـیچش‌سـنج دسـتی معمـولی، گشـتاور پیچشی مستقیماً به استوانه‌ی مذکور اعمال مـی‌شـود و به‌طور پیوسته و یکنواخت تا لحظـه‌ی گسـیخته شـدن کامپوزیت از سطح بتن بستر افزایش می‌یابـد. نحـوه‌ی انجام آزمون «پیچش»در شکل‌های(۷) و (۸) نشان داده شده است. مقدار لنگر پیچشی کـه باعـث کنـده شـدن کامپوزیت CFRP از سطح بتن بستر شده است، قرائت می‌شـود. بـرای بـه‌دسـت آوردن تـنش پـیچش نهـایی (شکست) از رابطه:

$$\tau = T\, r / J$$

به‌دست می‌آید که در آن:

$\tau$ تنش برشی، $T$ لنگر پیچشی نهـایی، $r$ شـعاع مغـزه‌ی جزئی و $J$ ممان اینرسی قطبی می‌باشد.

در ایـن تحقیقـات در پایـان هـر ۳۰ سـیکل سـه آزمون «پیچش» انجام شـده و میـانگین آنهـا بـه‌عنـوان نتیجه‌ی ثبت و معیار تعیین مقاومت چسـبندگی CFRP به بتن در نظر گرفته شده است.



شکل۵ اعمال چسب اپوکسی به استوانه‌ی فولادی



شکل٦ چسباندن استوانه‌ی فولادی به سطح CFRP



شکل۷ اعمال گشتاور پیچشی به‌وسیله‌ی پیچش سنج‌دستی



شکل۸ استوانه‌ی فلزی جدا شده از سطح بتن به‌همراه CFRP

## نتایج به‌دست آمده و تحلیل آن‌ها

### نتایج به‌دست آمده از اعمال سیکل‌های تغییر دما

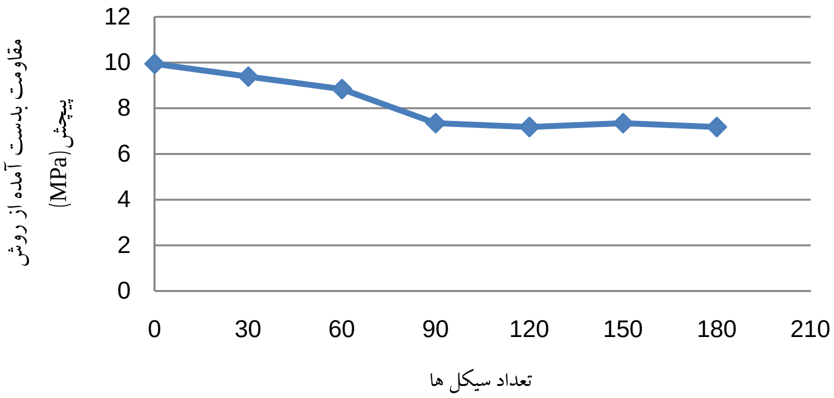
بنا به نظر بعضی از محققان، در دمای بیش از Tg (Glass transition temperature)، مدول الاستیسیته‌ی FRP با توجه به تغییرات ساختار مولکولی آن کاهش می‌یابد. در دمای بالا مقاومت کششی کامپوزیت نیز کاهش می‌یابد. نتایج بعضی از تحقیقات بیانگر کاهش ۲۰ درصدی مقاومت کششی الیاف کربن و الیاف شیشه در دمای ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد [1]. البته در آزمایش‌هایی که با روش بیرون کشیدن از سطح (Pull off) انجام شده، نشان داده شده است که عامل تغییر دما، در این محدوده‌ی دمایی تأثیر ناچیزی بر مقاومت چسبندگی FRP به بتن دارد [19].

نتایج این بخش از مطالعات در جدول (۵)و شکل‌های (۹) تا (۱۲) نشان داده شده‌اند. برای سنجش مقاومت چسبندگی در پایان هر ۳۰ سیکل، سه آزمایش «پیچش» انجام و میانگین قرائت‌های یاد شده محاسبه گردیده است. همان‌گونه که از جدول (۵) و شکل‌های (۹) و (۱۰) قابل مشاهده است، کاهش مقاومت به‌دست آمده از انجام آزمون «پیچش» پس از اعمال ۳۰، ٦۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ سیکل‌های تغییر دما، به‌ترتیب برابر۵/۵، ۱۱/۱، ٢٦/۱، ۲۷/۷، ٢٦/۱ و ۲۷/۷ درصد می‌باشد و این کاهش‌ها در سیکل‌های اولیه رخ داده ودر ادامه متوقف شده است. باید توجه داشت زمانی که این سیستم‌ها تحت تأثیر گرمای بالا قرار می‌گیرند، علاوه بر این‌که ممکن است خود مصالح به‌کارگرفته شده یعنی الیاف، چسب و عوامل تشکیل‌دهنده‌ی بتن شامل سنگدانه ها و خمیره‌ی سیمان سخت شده، دچار واکنش گردند، متفاوت بودن انبساط دمایی مصالح به‌کار گرفته شده نیز باعث ایجاد تنش‌های مخرب می‌گردد. در صورتی که این تنش‌ها از مقاومت متناظرموجود بیشتر گردد، باعث شکست خواهند شد. از طرفی اگر این تنش‌ها به آن حد نرسند که باعث شکست می‌شوند، تنش‌های پسماندی که در اعمال سیکل‌های دمایی بالا به‌وجود می‌آید، باعث کاهش مقاومت نهایی می‌گردد. هم‌چنین ممکن است

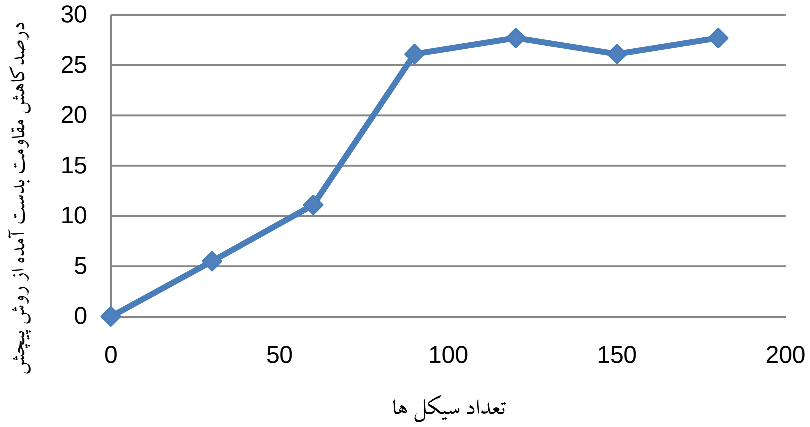
چسب به‌کار گرفته شده تحت تأثیر دماهای بالای اعمالی دچار افت در ویژگی شود و مقاومت نهایی را کاهش دهد. باید توجه داشت از آن‌جا که عملکرد این سیستم‌ها تحت شرایطی که معمولاً در هنگام بهره‌برداری از سازه پیش می‌آید مورد نظر بوده است و بررسی جزئیات شیمیایی و فیزیکی تأثیر دما بر هر یک از عناصر تشکیل‌دهنده‌ی این سیستم‌ها نیاز به تحقیقات تخصصی‌تر دارد که معمولاً به‌عهده‌ی متخصصان تولید چسب‌ها و الیاف‌ها گذاشته می‌شود.

جدول ۵ نتایج آزمایش «پیچش» برروی نمونه‌هایی که تحت شرایط سیکل‌های تغییر دما قرار گرفته‌اند

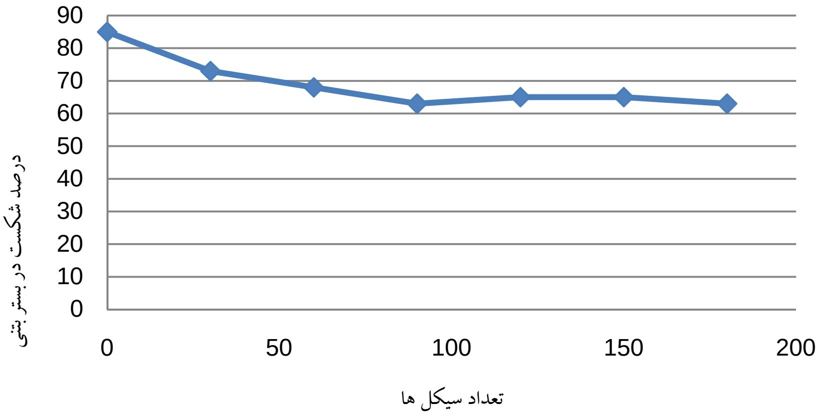
| متوسط درصد شکست در مرز بین بتن و الیاف | درصد شکست در مرز بین بتن و الیاف | متوسط درصد شکست در بتن | درصد شکست از بتن | کاهش مقاومت برشی نسبت به سیکل صفر (٪) | متوسط مقاومت برشی (MPa) | مقاومت برشی (MPa) | لنگر پیچشی (Nm) | سیکل |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱۵ | ۲۰ | ۸۵ | ۸۰ | ۰ | ۹/۹۵ | ۹/۳۹ | ۲۳۰/۴۸ | ۰ |
| | ۱۰ | | ۹۰ | | | ۹/۹۵ | ۲۴۴/۰۴ | |
| | ۱۵ | | ۸۵ | | | ۱۰/۵ | ۲۵۷/۶ | |
| ۲۷ | ۳۰ | ۷۳ | ۷۰ | ۵/۵ | ۹/۳۹ | ۸/۸۴ | ۲۱۶/۹۲ | ۳۰ |
| | ۳۰ | | ۷۰ | | | ۹/۳۹ | ۲۳۰/۴۸ | |
| | ۲۰ | | ۸۰ | | | ۹/۹۵ | ۲۴۴/۰۴ | |
| ۳۲ | ۳۵ | ۶۸ | ۶۵ | ۱۱/۱ | ۸/۸۴ | ۸/۲۹ | ۲۰۳/۳۶ | ۶۰ |
| | ۳۰ | | ۷۰ | | | ۸/۸۴ | ۲۱۶/۹۲ | |
| | ۳۰ | | ۷۰ | | | ۹/۳۹ | ۲۳۰/۴۸ | |
| ۳۷ | ۴۵ | ۶۳ | ۵۵ | ۲۶/۱ | ۷/۳۵ | ۶/۶۳ | ۱۶۲/۷ | ۹۰ |
| | ۳۵ | | ۶۵ | | | ۷/۱۸ | ۱۷۶/۲۵ | |
| | ۳۰ | | ۷۰ | | | ۸/۲۹ | ۲۰۳/۳۶ | |
| ۳۵ | ۳۵ | ۶۵ | ۶۵ | ۲۷/۷ | ۷/۱۸ | ۶/۶۳ | ۱۶۲/۷ | ۱۲۰ |
| | ۳۵ | | ۶۵ | | | ۷/۱۸ | ۱۷۶/۲۵ | |
| | ۳۵ | | ۶۵ | | | ۷/۷۴ | ۱۸۹/۸ | |
| ۳۵ | ۴۰ | ۶۵ | ۶۰ | ۲۶/۱ | ۷/۳۵ | ۷/۱۸ | ۱۷۶/۲۵ | ۱۵۰ |
| | ۳۰ | | ۷۰ | | | ۷/۱۸ | ۱۷۶/۲۵ | |
| | ۳۵ | | ۶۵ | | | ۷/۷۴ | ۱۸۹/۸ | |
| ۳۷ | ۴۰ | ۶۳ | ۶۰ | ۲۷/۷ | ۷/۱۸ | ۶/۶۳ | ۱۶۲/۷ | ۱۸۰ |
| | ۳۵ | | ۶۵ | | | ۷/۱۸ | ۱۷۶/۲۵ | |
| | ۳۵ | | ۶۵ | | | ۷/۷۴ | ۱۸۹/۸ | |



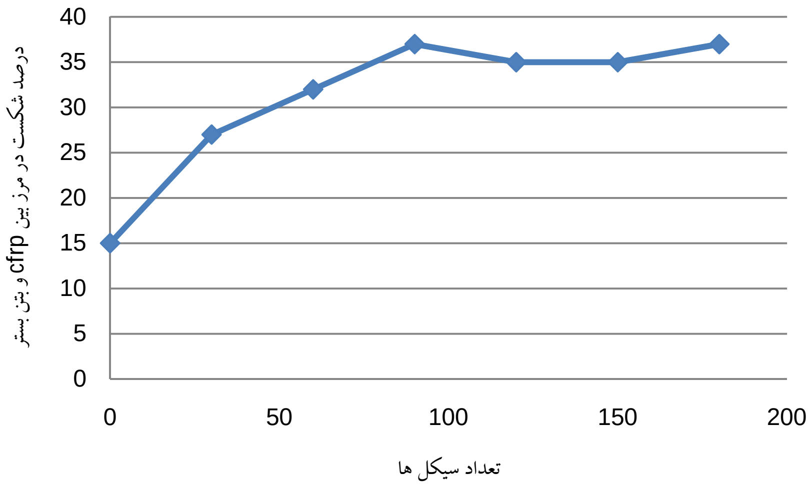

شکل ۹ مقاومت به‌دست آمده از انجام آزمون «پیچش» برروی سیستم‌های CFRP چسبانده شده به سطوح بتنی، پس از اعمال سیکل‌های تغییر دما




شکل ۱۰ میزان درصد کاهش مقاومت به‌دست آمده از انجام آزمون «پیچش» برروی سیستم‌های CFRP چسبانده شده برروی سطوح بتنی، پس از اعمال سیکل‌های تغییر دما، نسبت به مقاومت اولیه




شکل ۱۱ میانگین درصد شکست در بتن بستر، به‌دلیل اعمال سیکل‌های مختلف تغییر دما در سیستم‌های CFRP چسبانده شده به سطوح بتنی




شکل ۱۲ میانگین درصد شکست در مرز بین لایه‌های CFRP و بتن بستر، به‌دلیل اعمال سیکل‌های مختلف تغییر دما

با مطالعه‌ی مغزه‌های جزئی پس از انجام آزمون «پیچش» همان‌گونه که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، مشاهده گردید که در سیکل صفر یعنی قبل از اعمال سیکل‌های تغییر دما، حدود ۸۵ درصد شکست‌ها در بتن بستر رخ داده است. هم‌چنین این شکل نشان می‌دهد که با ادامه‌ی سیکل‌های تغییر دما شکست در بستر بتنی به ٦۳ درصد تقلیل یافته است. این مطلب بیانگر آنست که مقاومت چسبندگی لایه‌های CFRP چسبانده شده بر بستر بتنی، با افزایش سیکل‌های تغییر دما کاهش می‌یابد و به همین دلیل است که درصد شکست در مرز بین لایه‌ی CFRP و بستر بتنی، با افزایش اعمال سیکل‌های تغییر دما افزایش یافته است.هم‌چنین بررسی در صد شکست‌های مندرج در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) بیانگر آنست که چون در محدوده‌ی تنشی اعمال شده (مقاومت پیچشی به‌دست آمده)، شکستی در خود CFRP مشاهده نشده است،تغییرات دمایی اعمال شده تأثیری بر عملکرد لایه‌های CFRP نداشته است.

بررسی شکل (۱۲) نشان می‌دهد که با اعمال سیکل‌های مختلف تغییر دما، تا حدود ۱۰۰ سیکل، درصد شکست در مرز بین لایه‌های CFRP و بستر بتنی افزایش می‌یابد و سپس با ادامه‌ی این سیکل‌ها این درصد تقریباً ثابت می‌ماند. شاید بتوان دلیل این امر را به تعادل رسیدن میزان کاهش مقاومت سیستم و درصدهای شکست در بتن و مرز بین بتن و لایه‌های CFRP چسبانده شده به سطح دانست.

## نتایج حاصل از اعمال سیکل‌های تر و خشک شدن

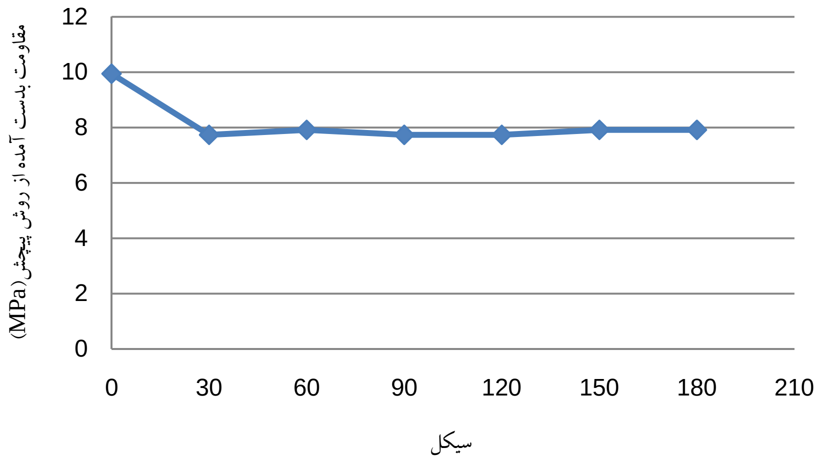
بعضی از تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که رطوبت تأثیرات سوء شناخته‌شده‌ای بر الیاف کربن ندارد. هم‌چنین گفته شده است که جذب آب توسط چسب رزین ممکن است در مواردی بعضی از خصوصیات رزین را تغییر دهد که چنین تغییراتی عمدتاً در دمای بالای ۱۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد ممکن است اتفاق بیافتد و در اثر آن سختی رزین به‌شدت کاهش یابد. البته در آزمایش‌هایی که با روش بیرون کشیدن از سطح (Pull off) انجام شده است، نشان داده شده است که عامل تر و خشک شدن تأثیر ناچیزی بر مقاومت چسبندگی FRP به بتن دارد [19,20].

پس از تعیین مقاومت اولیه‌ی نمونه‌های بتنی (قبل از اعمال سیکل‌های تروخشک شدن) در پایان هر ۳۰

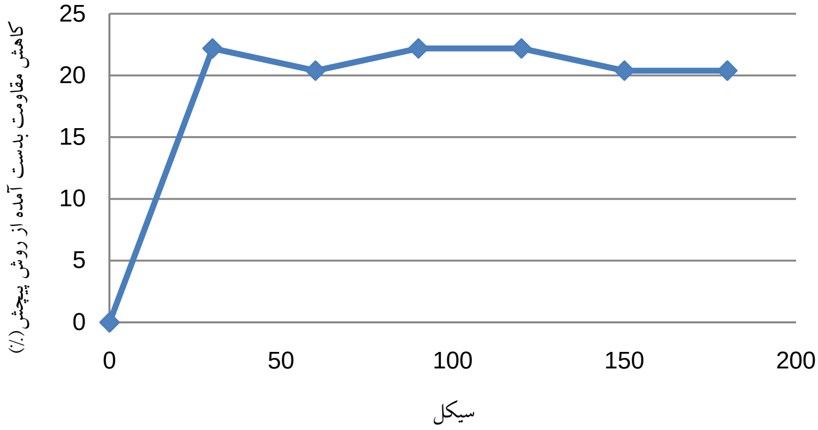
سیکل تر و خشک شدن، سه آزمون «پیچش» انجام و میانگین آنها ثبت گردید. براساس نتایج نشان داده شده در جدول (٦) و شکل‌های (١٣) و (١٤) میانگین کاهش مقاومت به‌دست آمده از روش «پیچش» پس از اعمال ٣٠، ٦٠، ١٢٠،٩٠، ١٥٠ و ١٨٠ سیکل تر و خشک شدن به‌ترتیب برابر ٢٢/٢، ٢٠/٤، ٢٢/٢، ٢٢/٢، ٢٠/٤ و ٢٠/٤ درصد می‌باشد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که کاهش مقاومت‌های به‌دست آمده در ٣٠ سیکل اول صورت گرفته است، و مقاومت سیستم مورد آزمایش در سیکل‌های بعدی تقریباً ثابت مانده است.

جدول ٦ نتایج انجام آزمون «پیچش» برروی سیستم‌های CFRP چسبانده شده به سطوح بتنی که تحت شرایط سیکل‌های تر و خشک شدن قرار گرفته‌اند

| سیکل | لنگر پیچشی (Nm) | مقاومت برشی (MPa) | متوسط مقاومت برشی (MPa) | درصد کاهش مقاومت برشی نسبت به سیکل صفر | درصد شکست در بتن | متوسط درصد شکست در بتن | درصد شکست در مرز بین بتن و الیاف | متوسط درصد شکست در مرز بین بتن و الیاف |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ٠ | ٢٣٠/٤٨ | ٩/٣٩ | ٩/٩٥ | ٠ | ٨٠ | ٨٥ | ٢٠ | ١٥ |
| | ٢٤٤/٠٤ | ٩/٩٥ | | | ٩٠ | | ١٠ | |
| | ٢٥٧/٦ | ١٠/٥ | | | ٨٥ | | ١٥ | |
| ٣٠ | ١٦٢/٧ | ٦/٦٣ | ٧/٧٤ | ٢٢/٢ | ١٠ | ٥ | ٩٠ | ٩٥ |
| | ٢٠٣/٣٦ | ٨/٢٩ | | | ٠ | | ١٠٠ | |
| | ٢٠٣/٣٦ | ٨/٢٩ | | | ٥ | | ٩٥ | |
| ٦٠ | ١٨٩/٨ | ٧/٧٤ | ٧/٩٢ | ٢٠/٤ | ٥ | ٥ | ٩٥ | ٩٥ |
| | ١٨٩/٨ | ٧/٧٤ | | | ٥ | | ٩٥ | |
| | ٢٠٣/٣٦ | ٨/٢٩ | | | ٥ | | ٩٥ | |
| ٩٠ | ١٦٢/٧ | ٦/٦٣ | ٧/٧٤ | ٢٢/٢ | ٥ | ٥ | ٩٥ | ٩٥ |
| | ١٨٩/٨ | ٧/٧٤ | | | ٥ | | ٩٥ | |
| | ٢١٦/٩٢ | ٨/٨٤ | | | ٥ | | ٩٥ | |
| ١٢٠ | ١٧٦/٢٥ | ٧/١٨ | ٧/٧٤ | ٢٢/٢ | ٥ | ٥ | ٩٥ | ٩٥ |
| | ١٨٩/٨ | ٧/٧٤ | | | ٥ | | ٩٥ | |
| | ٢٠٣/٣٦ | ٨/٢٩ | | | ٥ | | ٩٥ | |
| ١٥٠ | ١٨٩/٨ | ٧/٧٤ | ٧/٩٢ | ٢٠/٤ | ٥ | ٥ | ٩٥ | ٩٥ |
| | ١٨٩/٨ | ٧/٧٤ | | | ٥ | | ٩٥ | |
| | ٢٠٣/٣٦ | ٨/٢٩ | | | ٥ | | ٩٥ | |
| ١٨٠ | ١٧٦/٢٥ | ٧/١٨ | ٧/٩٢ | ٢٠/٤ | ٥ | ٥ | ٩٥ | ٩٥ |
| | ٢٠٣/٣٦ | ٨/٢٩ | | | ٥ | | ٩٥ | |
| | ٢٠٣/٣٦ | ٨/٢٩ | | | ٥ | | ٩٥ | |



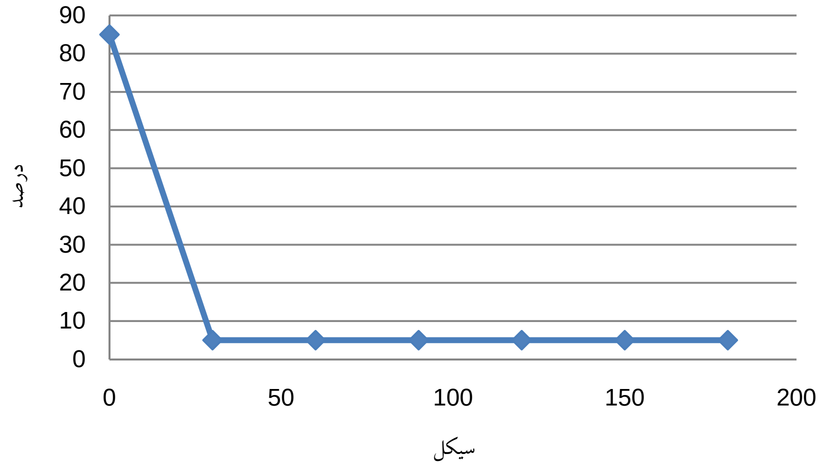

شکل ۱۳ مقاومت به‌دست آمده از انجام آزمون «پیچش» برروی سیستم‌های CFRP چسبانده شده به سطوح بتنی، پس از اعمال سیکل‌های تر و خشک شدن



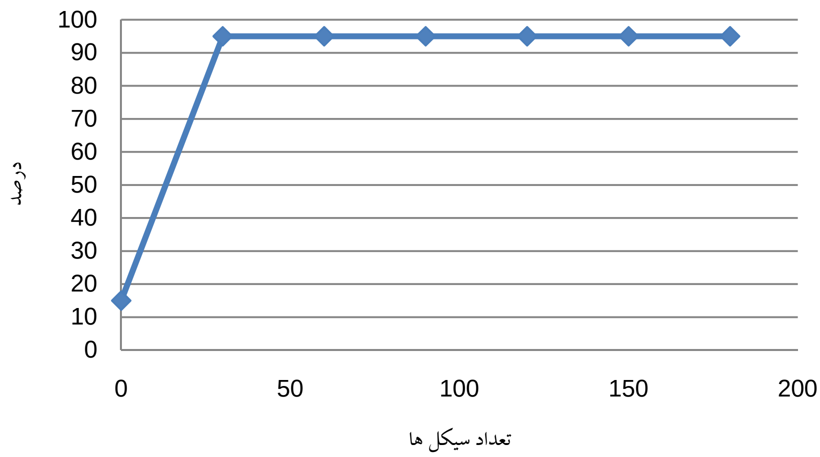

شکل ١٤ میزان درصد کاهش مقاومت به‌دست آمده از انجام آزمون «پیچش» بر روی سیستم‌های CFRP چسبانده شده بر روی سطوح بتنی، پس از اعمال سیکل‌های تر و خشک شدن، نسبت به مقاومت اولیه

از بررسی نتایج مندرج در جدول (٦) و شکل‌های (١٥) و (١٦) مشاهده می‌شود که درصد شکست در بتن بستر از حدود ٨٥ درصد (در زمان قبل از اعمال سیکل‌های تر و خشک شدن) به حدود ٥ درصد پس از اعمال ٣٠ سیکل اولیه‌ی تر و خشک شدن تقلیل یافته است. این امر نشان می‌دهد که مقاومت چسبندگی در مرز بین لایه‌های CFRP و بتن بستر، تحت ٣٠ سیکل تر و خشک شدن به میزانی کاهش یافته که ٩٥ درصد شکست‌های آزمون‌های «پیچش» در مرز مشترک صورت گرفته است. از آن‌جا که اکثر رزین‌های به‌کار گرفته شده به‌عنوان چسب، حساسیت زیادی به رطوبت نشان می‌دهند، این کاهش مقاومت چسبندگی می‌تواند به‌دلیل تأثیر منفی رطوبت در سیکل‌های متوالی اولیه رخ داده باشد. البته همان‌گونه که از این نتایج قابل‌مشاهده است، به نظر می‌رسد پس از گذشت ٣٠ سیکل اولیه، هم مقاومت و هم درصد شکست در بتن و مرزمشترک بین بتن بستر و لایه‌های CFRP تقریباً ثابت مانده است که می‌تواند دلالت بر آسیب‌دیدگی چسبندگی بین دو لایه در زمان تماس آب با چسب به‌کارگرفته شده در سیکل‌های اولیه باشد. البته در آزمایش‌های تر و خشک شدن نباید از تأثیر انبساط نامتجانس حاصل از جذب رطوبت و

جمع‌شدگی نامتجانس حاصل از خشک شدن، به عوامل موجود در چنین سیستم هایی غافل بود. لذا به‌نظر می‌رسد که تنش‌های حاصل از ناسازگاری انبساط و انقباض نامتجانس به‌وجود آمده در لایه‌های CFRP، چسب اعمال شده برای چسباندن این لایه‌ها، وبتن بستر، به قدرت تخریبی نفوذ و جذب آب به هنگام تر شدن سیستم، افزوده باشد. البته رسیدن به یک ثبات نسبی، پس از اعمال ۳۰ سیکل تر و خشک شدن اولیه، می‌تواند به کمبودن اثر این نوع انقباض‌ها و انبساط‌ها دلالت نماید. هم‌چنین به‌دلیل این‌که در آزمون‌های انجام‌شده، شکستی در لایه‌های CFRP مشاهده نشده است می‌توان در ابتدا چنین نتیجه گرفت که در محدوده‌ی تنش‌های وارد، لایه‌های CFRP آسیبی ندیده‌اند. اما این استدلال نمی‌تواند این‌طور تلقی شود که این لایه‌ها هرگز آسیبی ندیده‌اند؛ چون ممکن است مقاومت خود لایه‌های CFRP، آسیب دیده باشد چون مقاومت چسبندگی در مرز و مقاومت بتن بستر کمتر از مقاومت لایه‌های CFRP می‌باشد، که در هنگام انجام آزمون دچار شکست می‌گردند، اجازه‌ی بررسی مقدار افت در مقاومت خود لایه‌های CFRP را نمی‌دهند.




شکل ۱۵ میانگین درصد شکست در بتن بستر، به‌دلیل اعمال سیکل‌های مختلف تر و خشک شدن در سیستم‌های CFRP چسبانده شده به سطوح بتنی



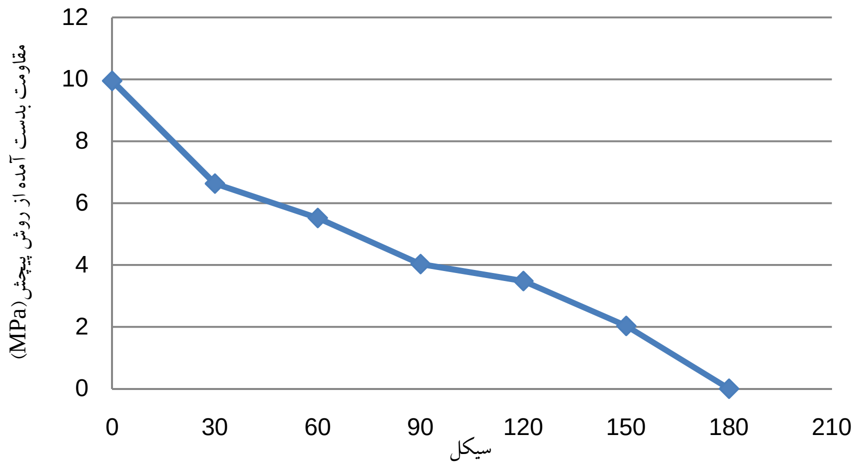

شکل ١٦ میانگین درصد شکست در مرز بین لایه‌های CFRP و بتن بستر، به‌دلیل اعمال سیکل‌های مختلف تر و خشک شدن

## نتایج به‌دست آمده از اعمال سیکل‌های یخ زدن و آب شدن

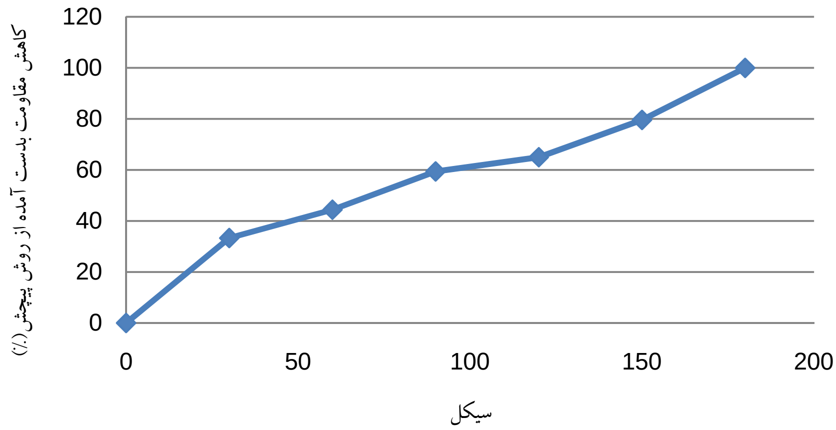
نتایج به‌دست آمده از این بخش از مطالعات در جدول (۷) و شکل‌های (۱۷) تا (۲۰) ارائه گردیده است. همان‌گونه که از این نتایج قابل مشاهده است، مقاومت به‌دست آمده پس از اعمال ۱۸۰ سیکل یخ زدن و آب شدن، مقاومت چسبندگی لایه‌های CFRP به بستر بتنی به صفر کاهش داده است. نکته‌ای که باید مورد توجه قرار گیرد آنست که نباید بررسی درصد شکست‌های رخ داده در مرز بین بستر بتنی و لایه‌های CFRP که در شکل (۲۰) نشان داده شده است، بیانگر آن باشد که سیکل‌های اعمالی یخ زدن و آب شدن، به بتن بستر و هم‌چنین لایه‌های CFRP آسیبی نرسانده است، زیرا کاهش زیاد مقاومت چسبندگی بین لایه‌های CFRP و بستر بتنی، به‌دلیل اعمال سیکل‌های یخ زدن و آب شدن، باعث می گردد تا هنگام انجام آزمون «پیچش» ، شکست در مرز رخ بدهد و نتوانیم مقاومت سایر قسمت‌هارا تخمین بزنیم. بررسی نتایج مندرج در شکل (۱۷) بیانگر آنست که می‌توان یک رابطه‌ی خطی بین سیکل‌های یخ زدن و آب شدن و کاهش مقاومت تعریف نمود و حتی عمر مفید چنین سیستم‌هایی را در شرایط مشابه تعریف نمود.

جدول ۷ نتایج انجام آزمون «پیچش» بر روی سیستم‌های CFRP چسبانده شده به سطوح بتنی که تحت شرایط یخ زدن و آب شدن قرار گرفته‌اند

| سیکل | لنگر پیچشی (N.m) | تنش برشی (MPa) | متوسط تنش برشی (MPa) | درصد کاهش تنش برشی نسبت به سیکل صفر | درصد شکست در بتن | متوسط درصد شکست در بتن | درصد شکست در مرز بین بتن و الیاف | متوسط درصد شکست در مرز بین بتن و الیاف |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۰ | ۲۳۰/٤۸ | ۹/۳۹ | ۹/۹٥ | ۰ | ۸۰ | ۸٥ | ۲۰ | ۱٥ |
| | ۲٤٤/۰٤ | ۹/۹٥ | | | ۹۰ | | ۱۰ | |
| | ۲٥۷/٦ | ۱۰/٥ | | | ۸٥ | | ۱٥ | |
| ۳۰ | ۱٤۹/۳ | ٦/۰۸ | ٦/٦۳ | ۳۳/۳ | ٥ | ٥ | ۹٥ | ۹٥ |
| | ۱٦۲/۷ | ٦/٦۳ | | | ٥ | | ۹٥ | |
| | ۱۷٦/۲٥ | ۷/۱۸ | | | ٥ | | ۹٥ | |
| ٦۰ | ۱۲۲/۰۲ | ٤/۹۷ | ٥/٥۲ | ٤٤/٤ | ٥ | ٥ | ۹٥ | ۹٥ |
| | ۱۳٥/٥۸ | ٥/٥۲ | | | ٥ | | ۹٥ | |
| | ۱٤۹/۱۳ | ٦/۰۸ | | | ٥ | | ۹٥ | |
| ۹۰ | ۹٤/۹ | ۳/۸۷ | ٤/۰۳ | ٥۹/٤ | ۰ | ۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ |
| | ۹٤/۹ | ۳/۸۷ | | | ۰ | | ۱۰۰ | |
| | ۱۰۸/٤٦ | ٤/٤۲ | | | ۰ | | ۱۰۰ | |
| ۱۲۰ | ۸۱/۳٦ | ۳/۳۲ | ۳/٤۸ | ٦٥ | ۰ | ۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ |
| | ۸۱/۳٦ | ۳/۳۲ | | | ۰ | | ۱۰۰ | |
| | ۹٤/۹ | ۳/۸۷ | | | ۰ | | ۱۰۰ | |
| ۱٥۰ | ٤۰/٦۷ | ۱/٦٦ | ۲/۰۳ | ۷۹/٦ | ۰ | ۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ |
| | ٥٤/۲۳ | ۲/۲۱ | | | ۰ | | ۱۰۰ | |
| | ٥٤/۲۳ | ۲/۲۱ | | | ۰ | | ۱۰۰ | |
| ۱۸۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۰۰ | ۰ | ۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ |
| | ۰ | ۰ | | | ۰ | | ۱۰۰ | |
| | ۰ | ۰ | | | ۰ | | ۱۰۰ | |



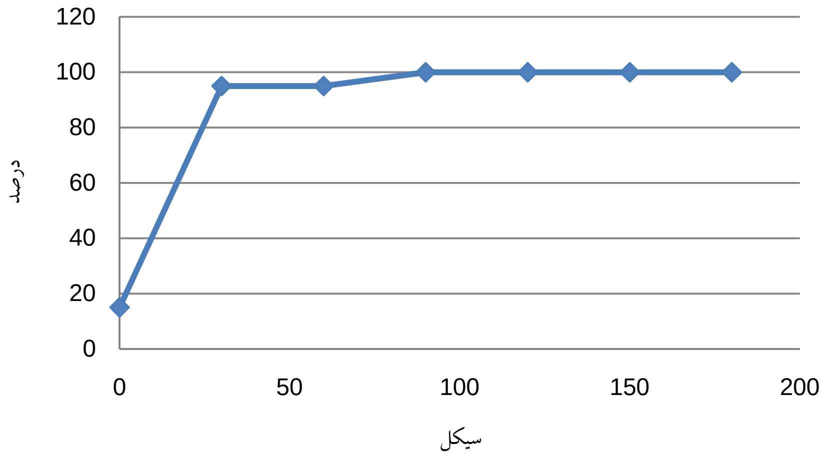

شکل ۱۷ مقاومت به‌دست آمده از انجام آزمون «پیچش» بر روی سیستم‌های CFRP چسبانده شده به سطوح بتنی، پس از اعمال سیکل‌های یخ زدن و آب شدن




شکل ۱۸ میزان درصد کاهش مقاومت به‌دست آمده از انجام آزمون «پیچش» بر روی سیستم‌های CFRP چسبانده شده بر روی سطوح بتنی، پس از اعمال سیکل‌های یخ زدن و آب شدن، نسبت به مقاومت اولیه




شکل ۱۹ میانگین درصد شکست در بتن بستر، به‌دلیل اعمال سیکل‌های مختلف یخ زدن و آب شدن در سیستم‌های CFRP چسبانده شده به سطوح بتنی




شکل ۲۰ میانگین درصد شکست در مرز بین لایه‌های CFRP و بتن بستر، به‌دلیل اعمال سیکل‌های مختلف یخ زدن و آب شدن

باید توجه داشت که تحت شرایط یخ زدن، آب موجود در حفره‌های سیستم CFRP چسبانده شده به سطوح بتنی، دچار انبساط می‌شود و به عناصر مجاور، تنشی وارد می‌آورد و اگر این تنش به‌وجود آمده از مقاومت عناصر اطراف بیشتر گردد، باعث شکست آن‌ها می‌گردد. با تکرار سیکل‌های یخ زدن و آب شدن، خرابی بیشتری رخ می‌دهد که در نهایت به انهدام کامل منجر می‌شود. از طرفی ذوب یخ باعث افزایش دما می‌گردد و ضمن کاهش ازحجم آب یخ زده، باعث افزایش حجم دیگرعناصر موجود در سیستم می‌گردد که این عمل باعث تشدید خرابی حاصل از انبساط دمایی می‌گردد. هم‌چنین وجود آب باعث آسیب‌دیدگی چسب به‌کارگرفته شده ونیز بتن بستر می‌گردد.

با این‌که بعضی از محققان براین عقیده‌اند که به‌جز در مواردی که کامپوزیت درصد قابل‌توجهی حفره‌های متصل به یکدیگر پر از آب داشته باشد، تأثیرات یخ زدن و ذوب شدن در محدودهٔ دمایی متداول (C30° تا C20° -) بر مقاومت، جزیی بوده و حائز اهمیت نیست ولی نتایج فوق نشان می‌دهد که یافته‌های ابراز شده توسط این محققان حداقل در شرایط مشابه آزمایش‌های صورت گرفته، معتبر نمی‌باشد. هم‌چنین گفته می‌شود که سیکل‌های حرارتی در دمای پایین باعث می‌شود تا به‌دلیل تفاوت‌های موجود در ضرایب انبساط دمایی عوامل تشکیل‌دهنده‌ی سیستم، تنش‌های پس‌ماند در لایه‌های CFRP ، و ریزساختار دیگر اجزای موجود ایجاد شود. با این‌که تغییرات در گسترش ریزترک ها در محدودهٔ متداول دمای بهره‌برداری (C30° تا C20° -)، معمولاً جزئی است، ولی تحت شرایط سیکل‌های حرارتی شدید، مثلاً بین C60°+ تا C60°-، ریزترک‌ها امکان رشد و به‌هم پیوستن پیدا می‌کنند که منجر به تشکیل ترک‌هائی در خود ماتریس می‌شودکه منجر به زوال سختی و یا تأثیر منفی بر سایر خواص مشخصه‌های ماتریس می‌گردد [21]. البته در آزمایش‌هایی که با روش بیرون کشیدن از سطح (Pull off) انجام شده، نشان داده شده است که یخ زدن و آب شدن، تأثیر ناچیزی بر مقاومت چسبندگی FRP به بتن دارد[19]. هم‌چنین در آزمایشی کهدر مورد تأثیر یخ زدن و آب شدن با دو نوع آب معمولی و آب نمک انجام شده استبه این نتیجه رسیده‌اند که با آب معمولی، کاهش مقاومت چسبندگی FRP به بتن مشاهده نشده است ولی با آب نمک مقاومت چسبندگی به‌دلیل تخریب بتن، به‌کلی از بین رفته است.

برای تعیین مقاومت در پایان هر ۳۰ سیکل، سه

آزمایش پیچش انجام و میانگین آنها به‌عنوان مقاومت ثبت گردید سیکل‌های یخ زدن و آب شدن با توجه به مقادیر کاهش مقاومت چسبندگی، مقاومت آن را به‌طور کامل از بین می‌برند. البته به‌دلیل تعبیه‌ی مغزه‌های جزئی قبل از انجام سیکل‌های یخ زدن و آب شدن، احتمال تشدید آسیب‌ها نیز افزایش می‌یابد.

## نتیجه‌گیری

از مطالب ارائه شده در این مقاله می‌توان نتیجه‌های زیر را گرفت؛

۱- اعمال ۱۰۰ سیکل اولیه‌ی تغییردما، باعث کاهش حدود ۲۸ درصدی مقاومت پیچشی لایه‌های CFRP چسبانده شده به بتن گردید. در ادامه‌ی اعمال سیکل‌ها، تغییرات قابل‌توجهی در مقاومت یاد شده مشاهده نگردید. هم‌چنین درصد شکست در مرز بین لایه‌های CFRP به حداکثر حدود ۳۵ درصد رسید. چون پارگی در خود لایه‌های CFRP مشاهده نگردید، می‌توان ادعا نمود که در محدوده‌ی تنش‌های اعمالی، لایه‌های CFRP عملکرد مطلوبی داشتند.

۲- اعمال ۳۰ سیکل ترو خشک شدن متناوب به سیستم لایه‌های CFRP چسبانده شده به بستر بتنی، باعث کاهش مقاومت سیستم یاد شده به‌میزان حدود ۲۲ درصد گردید و افزایش سیکل‌های ترو خشک شدن تأثیری در مقاومت سیستم یاد شده نداشت. با توجه به حادث شدن ۹۵ درصد شکست در منطقه‌ی مرزبین لایه‌های CFRP و بتن بستر، می‌توان گفت که ۳۰ سیکل ترو خشک نمودن سیستم یاد شده، مقاومت چسبندگی لایه‌های CFRP به سطح بتنی را، بیش از مقاومت بتن تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به عدم حادث شدن پارگی در خود لایه‌های CFRP، می‌توان اظهار داشت که در محدوده‌ی تنش‌های وارد، لایه‌های CFRP عملکرد ما نسبی داشته‌اند.

۳- اعمال شرایط یخ زدن و آب شدن به لایه‌های CFRP چسبانده شده به بستر بتنی، نشان داد که سیکل‌های متناوب یخ زدن و آب شدن، باعث کاهش مقاومت چسبندگی لایه‌های CFRP چسبانده شده به بستر بتنی، می‌گردد و رابطه‌ی بین کاهش مقاومت و تعداد سیکل‌های اعمالی تقریباً خطی است. در مطالعات انجام شده مشاهده گردید که اعمال ۱۸۰ سیکل یخ زدن و آب شدن به لایه‌های CFRP چسبانده شده به بستر بتنی، باعث کاهش صددرصدی مقاومت چسبندگی لایه‌های CFRP چسبانده شده به بستر بتنی می‌شود. هم‌چنین مشاهده گردید که پس از اعمال حدود ۱۰۰ سیکل یخ زدن و ذوب شدن به سیستم‌های یاد شده، تقریباً تمامی شکست‌ها در مرز بین لایه‌های CFRP چسبانده شده و بستر بتنی، رخ داد. با عنایت به این درصد شکست و این‌که پارگی در خود لایه‌های CFRP چسبانده شده به بستر بتنی، رخ نداد می‌توان اظهار داشت که عملکرد خود لایه‌های CFRP تحت شرایط یاد شده و در محدوده‌ی تنش‌های وارد آمده، مطلوب می‌باشد. در مقایسه با دو شرایط دیگر مورد مطالعه قرار گرفته؛ یعنی اعمال سیکل‌های تغییر دما و ترو خشک شدن، شرایط یخ زدن و آب شدن بیشترین کاهش را در مقاومت چشبندگی لایه‌های CFRP چسبانده شده به بستر بتنی باعث گردید.

## مراجع


1. ACI 440.2R-02, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", (2002).
2. Hamada. H., Fukute. T., and Yamamoto. K., "Bending Behavior of Unbounded Prestressed Concrete

Beams Prestressed with CFRP Rods", Fiber Reinforced Cement and Concrete, Proceedings of the Fourth RILEM International Symposium, Sheffield, pp. 1015-1026, (1992).

3. Saadatmanesh. H., and Ehsani. M. R., "RC Beams Strengthened with GFRP Plates, I: Experimental Study", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 11, pp. 3417-3433, (1991).
4. Bedard . C., "Composite Reinforcing Bars: Assessing Their Use in Concrete", Concrete International, pp. 55-59, (1992).
5. Sharp. B. N., "Reinforced and Prestressed Concrete in Maritime Structures", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Building, Vol. 116, No. 3, pp. 449-469, (1996).
6. Rostasy. F. S., "FRP Tensile Elements for Prestressed Concrete – State of the Art, Potentials and Limits", Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, International Symposium, ACI-SP-138, pp. 347-366, (1993).
7. Saenz. N., E. J. Walsh, C. P. and Pantelides, and Adams. D. O., "Long Term Durability of FRP Composites for Infrastructure Rehabilitation, International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)", Vol. 49, pp. 2811– 2822, (2004).
8. Ammon. K., Berman . N., and Bank. C., Lawrence, "Effect High Temperature on Bond strength of FRP Rebars", *Journal of composites for construction*, 3(2), pp. 73-81, (1999).
9. Briccoli. B., and Rotunno. T., "Environmental Durability of the Bond between the CFRP Composite Materials and Masonry Structures" , Historical Construction, , pp.1039-1046, (2001).
10. Thomas. E., Bakis. C., and Brown. T. T., "Long-Term Durability Study of Sheet-Bonded GFRP", $2^{nd}$ *International \ Conference on Durability of FRP*, Sherbrooke, Canada, (2002).
11. نادری. م.، "روش‌های بهبود و تعیین آزمایشگاهی و درجای مقاومت بتن"، انتشارات روزبهان، صص. ۳۵ – ۷٤، (۱۳۸۸).
12. ASTM C 150-04, "Standard Specification for Portland Cement", (2004).
13. ASTM C1017-C1017M-03, "Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete", (2007).
14. A. G. Razaqpur, and A. H. Kashef, "State-of-the-Art on Fiber Reinforced Plastics for Buildings",Submitted to: Institute for Research in Construction – National Research Council of Canada, Carleton University, Ottawa, (1993).
15. B. M. McSweeney, M. M. Lopez,"FRP-Concrete Bond Behavior: A Parametric Study Through Pull-Off Testing",SP 230-26.http://quakewrap.com/frp%20papers /FRP- Concrete Bond Behavior AParametric Study Through Pull-Off Testing.pdf (2005).
16. N. Banthia, A. Abdolrahimzadeh,and M. Boulfiza, "Field Assessment of FRP Sheets-Concrete Bond Durability", *International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria)*- October, pp. 12-14, (2009).
17. ASTM C0666-C0666M-03, "Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing", (2008).

18. N. Naderi, "New Twist-Off Method for the Evaluation of In-Situ Strength of Concrete", *Journal of Testing and Evaluation ASTM Journal*. Vol. 35, Issue 6 , (2007).
19. S. Alsayed, "Evaluation Of Concrete/FRP Sheet Bond Under Different Environmental Conditions", SABIC, (2011).
20. A. R. Burnsell T, "Long-Term Degredation of Polimeric Matrix Composites", Concise Encyclopedia of Composite Materials, Pergamon Press, pp. 165-173, (1989).
21. H. W. Lord, and P. K. Dutta, "On the Design of Polymeric Composite Structures for Cold Region Applications", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 7, pp. 435-450, (1988).
22. P. Dohnálek, "Environmental durability of FRP bond to concrete subjected to freeze-thaw action", Thesis, (S.M.)- Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, (2006).